



不同类型天然草场优势牧草及其与补饲玉米组合效应研究

马秀花^{1†}, 保杰^{1†}, 张博^{1†}, 王智¹, 刘佳灌¹, 王雨婷¹, 王扬², 张晓嘉³, 徐民乐⁴, 字洪标⁵, 罗海玲^{1*}

1. 中国农业大学动物科技学院, 畜禽营养与饲养全国重点实验室, 北京 100193

2. 中国科学院植物研究所, 植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093

3. 内蒙古农业大学草原与资源环境学院, 草原资源教育部重点实验室, 呼和浩特 010011

4. 中国农业大学草业科学与技术学院, 北京 100193

5. 兰州大学草种创新与草地农业生态系统全国重点实验室, 兰州大学草地农业科技学院, 兰州 730020

† 同等贡献

* 联系人, E-mail: luohailing@cau.edu.cn

2024-02-25 收稿, 2024-05-07 修回, 2024-10-11 接受, 2024-10-24 网络版发表

国家自然科学基金重大项目(32192463)资助

摘要 随着草畜矛盾加剧, 草场退化导致提供饲草质量均下降, 因而给放牧家畜补饲玉米目前成为常态. 提高饲草料利用率有利于维持草畜平衡, 对此, 明确草场优势牧草及补饲饲料种类、营养价值, 以及其在动物体内的消化互作情况尤为重要. 本研究旨在探究不同类型草场中主要牧草营养价值及其在反刍动物瘤胃中的互作, 通过采集我国典型草原、荒漠草原、草甸草原、高寒草甸4个主要草场中占比前三的优势牧草样品, 并两两组合以及在此基础上分别与玉米组合, 利用瘤胃体外发酵技术研究营养发酵特征和产气动力学特征, 评估综合组合效应指数(multiple-factors associative effect index, MFAEI). 结果表明四种类型草场中大部分优势牧草互相组合、牧草组合添加玉米可提高干物质(dry matter, DM)、粗蛋白质(crude protein, CP)、粗脂肪(ether extract, EE)的消化率. 牧草组合可在不同程度上提高牧草的中性洗涤纤维消化率(neutral detergent fiber digestibility, NDFD)及酸性洗涤纤维消化率(acid detergent fiber digestibility, ADFD). 但不影响瘤胃发酵参数及气体组成比例; 而添加玉米会改变发酵底物结构, 增加丁酸、异位酸等短链脂肪酸的含量, 甲烷所占比例均在不同程度上增加, 其中典型草原中牧草组合添加玉米会显著提高甲烷比例. 大部分牧草组合及其与玉米混合发酵后其MFAEI表现正组合效应, 其中典型草原和荒漠草原中第一优势牧草羊草、短花针茅, 草甸草原和高寒草甸中菊科蒿属牧草均呈正向作用. 因此, 利用不同类型草场中优势牧草消化特点, 通过发挥牧草组合效应, 从而提高牧草利用率, 促进第一性生产力(牧草生产)向第二性生产力(家畜生产)的转化效率.

关键词 天然草原, 优势植物, 牧草利用效率, 组合效应

我国草原总面积2.64亿公顷, 约占全球草原面积的12%, 位居世界前列^[1]. 随着天然草场牧草产量与家畜所需饲草量的矛盾加剧^[2], 草场退化日趋严重. 而草畜平衡是草场管理的核心问题, 在制定草畜平衡管理策

略时, 需要考虑牧草和家畜两方面因素, 包括草场类型、牧草种类、牧草数量和质量, 以及家畜营养需求、生理状况等^[3]. 而家畜在放牧过程中会同时采食不同牧草的饲料营养物质、非营养物质及抗营养物质

引用格式: 马秀花, 保杰, 张博, 等. 不同类型天然草场优势牧草及其与补饲玉米组合效应研究. 科学通报, 2025, 70: 1612–1626

Ma X, Bao J, Zhang B, et al. Study on dominant pasture grasses in different types of natural grasslands and their combination effects with supplemental maize (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 1612–1626, doi: [10.1360/TB-2024-0209](https://doi.org/10.1360/TB-2024-0209)

间互动从而产生作用于家畜的组合效应(associative effective, AE)^[4]。体外发酵技术因其方法简便、快速、经济的特点,能够有效克服动物试验过程复杂,且易受动物个体差异及其生理状况变化影响的缺点,在饲草营养价值评价和饲料组合效应研究中被广泛应用^[5-7]。目前,国内外相关研究主要集中在秸秆等农作物副产物,且玉米作为生产中来源最广泛的精料,常用于与粗料混合饲喂提高饲粮营养水平。Sun等人^[8]研究发现,稻草与梯牧草组合表现为正组合效应,能够有效提高饲草利用率,且组合玉米可显著提高稻草的瘤胃发酵能力。魏学盛等人^[9]使用体外产气法探讨木薯渣与5种蛋白质饲料原料不同比例的组合效应,发现木薯渣-菜粕组分别为3:7、5:5时瘤胃发酵效率最高。典型草原、荒漠草原、草甸草原和高寒草甸作为我国主要的4种草场类型^[10],但其主要牧草营养价值及牧草间互作效应却鲜有研究。对此,为实现畜牧业生产与草场生态功能协同平衡发展^[11],明确各类型草场优势牧草种类、营养价值,以及其在动物体内的消化互作情况。本文利用体外发酵技术研究以上4种草场中优势牧草及其与玉米组合的瘤胃发酵规律,评价饲草料间组合效应,模拟反刍动物体内牧草间互作对各种牧草瘤胃发酵的影响,为放牧家畜管理等研究提供理论依据,为合理利用草场资源,维持动植物互作机制研究提供数据参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料和样品制备

2023年10月份分别收集典型草原(锡林郭勒)、荒漠草原(四子王旗)、草甸草原(呼伦贝尔)、高寒草甸(青海海北)4种类型草场中占比前3的优势牧草各650 g以上。其中典型草原为羊草(*Leymus chinensis*, Lc, 占比49.57%)、羽茅(*Achnatherum sibiricum*, As, 占比6.38%)、大针茅(*Stipa grandis*, Sg, 占比1.16%);荒漠草原为短花针茅(*Stipa breviflora*, Sb, 占比70%)、无芒隐子草(*Cleistogenes songorica*, Cs, 占比20%)、冷蒿(*Artemisia frigida*, Af, 占比8%);草甸草原为羊草(*Leymus chinensis*1, Lc1, 占比40%)、裂叶蒿(*Artemisia tanacetifolia*, At, 占比10%)、展枝唐松草(*Thalictrum squarrosum*, Ts, 占比7%);高寒草甸为异针茅(*Stipa aliena*, Sa, 占比34.3%)、紫羊茅(*Festuca rubra* Fr, 占比6.9%)、矮蒿(*Artemisia lancea*, Al, 占比5.0%)。所述牧草占比为由单位面积该物种的生物量与单位面积总生

物量的比值。所选精料为玉米(maize, M)。以上牧草和玉米样品均于65℃风干后粉碎过0.425 mm筛备用^[12]。

1.2 试验设计

每种草场中分别由3种优势草、3种优势草两两组合(比例为1:1)、3种优势草两两组合基础上添加玉米(比例为1:1:1)共9种发酵底物组成,4种草场共36组。采用体外发酵产气法,产气试验为72 h,每组设6个重复;发酵试验为48 h,每组设9个重复。

1.3 体外降解试验

体外瘤胃降解试验采用恒温培养箱进行。分别称取各组样品约3.0 g于250 mL发酵瓶中,依次加入150 mL人工唾液^[13]和75 mL瘤胃液,随后持续通入10 s N₂以排出瓶中剩余O₂,立即盖紧瓶塞,置于39℃恒温培养箱中连续培养48 h。每个发酵瓶外接气袋收集气体,利用气相色谱法测定CH₄、H₂和CO₂比例。

发酵结束后立即将发酵瓶放入冰水中终止发酵,采集发酵上清液分装到10 mL离心管中,置于-80℃储存,用于氨态氮(NH₃-N)^[14]和挥发性脂肪酸(volatile fatty acids, VFAs)浓度^[15]的测定;随后用滤袋过滤残渣并洗净,置于烘箱中80℃烘干48 h至恒重后称重,收集残渣样品进行常规营养成分分析^[16]。测定干物质消化率(dry matter digestibility, DMD)、粗蛋白质消化率(crude protein digestibility, CPD)、粗脂肪消化率(ether extract digestibility, EED)、中性洗涤纤维消化率(neutral detergent fiber digestibility, NDFD)、酸性洗涤纤维消化率(acid detergent fiber digestibility, ADFD)。

1.4 体外产气试验

体外产气试验采用AGRS-Ⅲ微生物发酵微量产气自动记录仪进行。分别称取约0.5 g各组样品于150 mL发酵瓶中,依次加入50 mL人工唾液和25 mL瘤胃液,随后持续通入10 s CO₂以排出瓶中剩余氧气,立即盖紧瓶塞,并将每个发酵瓶依次与产气记录仪各通道相连接,置于39℃恒温培养箱中连续培养72 h,实时记录其产气压力,计算其产气量(GP)。参照Groot等人^[17]提出的指数函数模型对不同饲料累积产气量数据进行非线性拟合,得出式(1):

$$GP_t = A / [1 + (C/t)B], \quad (1)$$

式中, GP_t为累积产气量(mL/g, 干物质基础), A为发酵

底物在该产气速率下的理论最大产气量(mL/g, 干物质基础), B 是产气曲线的锋度, C 为达到最大产气量1/2的时间(h), t 为产气时间(h).

遵循Wang等人^[18]的模型, 计算平均产气速率(AGPR, mL/(g h)), 使用式(2):

$$AGPR = (A \times B) / (4 \times C). \quad (2)$$

1.5 组合效应值计算

参考王旭^[19]的组合效应计算公式, 计算每个组合底物发酵后GP_{72h}、DMD、NH₃-N和TVFA(总挥发性脂肪酸)指标的单项组合效应值(single-factors associative effect index, SFAEI)和综合组合效应值(multiple-factors associative effect index, MFAEI), 式(3)、(4)如下:

$$SFAEI = (W_{\text{组合估值值}} - W_{\text{加权估值值}}) / W_{\text{加权估值值}}, \quad (3)$$

$$MFAEI = \sum_{i=1}^n SFAEI_i, \quad (4)$$

其中, $W_{\text{加权估值值}} = \sum_{i=1}^n X_{i\text{原料实测值}} \times Y_{i\text{原料百分比}}$.

1.6 数据统计及分析

所有数据经过Excel 2019软件初步整理, 使用SPSS 22.0数据分析软件对优势牧草常规营养成分、营养物质消化率、体外发酵参数、气体成分及产气量进行单因素方差分析(One-way ANOVA), 利用Duncan's法进行多重比较分析差异显著性, $P < 0.05$ 表示差异显著, $P > 0.05$ 表示差异不显著.

2 结果分析

2.1 不同类型草场优势牧草常规营养成分分析

4种类型草场中优势草的常规营养成份含量(表1). 荒漠草原无芒隐子草CP含量、草甸草原羊草EE含量, 典型草原羊草NDF含量、荒漠草原冷蒿ADF含量最高.

2.2 不同类型草场优势牧草及其组合对营养物质消化率影响

典型草原内牧草组合相较单独牧草营养物质消化率增加(图1(a)). 其中, 羽茅(As)、大针茅(Sg)通过与羊草(Lc)组合均显著提高其DMD、CPD、EED($P < 0.05$); $Lc+Sg$ 组合较 Sg 的NDFD显著提高50.97%($P < 0.05$). 此外, 牧草组合基础上添加玉米可显著提高DMD($P < 0.05$). $Lc+Sg$ 组合添加玉米后CPD显著提高8.53%($P < 0.05$); As

+ Lc 、 $Lc+Sg$ 组合在添加玉米后EED显著升高($P < 0.05$), 分别提高30.19%、20.62%; 而 $As+Sg$ 组合添加玉米后ADFD显著降低8.70%($P < 0.05$).

荒漠草原内牧草组合后营养物质消化率有所提高(图1(b)). 其中, 无芒隐子草(Cs)通过与短花针茅(Sb)组合, 其NDFD显著提高40.87%($P < 0.05$). Sb 与冷蒿(Af)组合后, 其DMD、CPD、EED、NDFD和ADFD得到显著提高($P < 0.05$), 分别提高37.96%、19.80%、65.43%、63.17%、70.21%. 各优势牧草组合添加玉米后, 均可显著提高DMD($P < 0.05$), 其中, $Cs+Sb$ 组合添加玉米可显著提高CPD和EED($P < 0.05$), 分别提高17.66%、147.93%; 而 $Af+Sb$ 组合添加玉米后CPD显著降低($P < 0.05$); $Af+Cs$ 组合添加玉米后显著降低NDFD和ADFD($P < 0.05$).

草甸草原内各牧草通过组合后营养物质消化率显著提高(图1(c)). 其中, 羊草(LcI)+裂叶蒿(At)组合、 LcI +展枝唐松草(Ts)组合DMD和CPD显著高于 LcI ($P < 0.01$); $LcI+Ts$ 组合EED和NDFD较 Ts 显著提高($P < 0.01$), 分别提高9.37%和18.13%; 对于DMD、NDFD、ADFD、EED, $At+Ts$ 组合显著高于 Ts ($P < 0.05$); $At+Ts$ 组合CPD和EED较 At 显著升高($P < 0.05$), 分别提高4.48%和16.08%. 此外, 各牧草组合添加玉米后显著增加了DMD和CPD($P < 0.05$); 且 $LcI+At$ 组合添加玉米后相较 $LcI+At$ 组合EED显著提高25.25%($P < 0.05$); $At+Ts$ 组合添加玉米后相较 $At+Ts$ 组合EED显著提高3.46%($P < 0.05$).

高寒草甸内异针茅(Sa)与矮蒿(Al)组合可显著提高DMD(图1(d)). 其中, 矮蒿(Al)分别与异针茅(Sa)、紫羊茅(Fr)组合显著提高其CPD、NDFD及ADFD($P < 0.05$); $Sa+Fr$ 组合较 Sa 、 Fr 的EED分别提高24.91%和32.35%($P < 0.05$). 各牧草组合添加玉米后可显著提高DMD($P < 0.05$). $Sa+Fr$ 和 $Fr+Al$ 组合添加玉米后可显著提高CPD($P < 0.05$); $Fr+Al$ 组合添加玉米后EED也得到显著增加($P < 0.05$).

2.3 不同类型草场优势牧草及其组合对发酵参数及产气动力学参数的影响

4种类型草场测定了发酵参数(氨态氮、挥发酸), 气体成分(氢气、甲烷、二氧化碳)和产气动力学参数(GP₇₂、GP₄₈、A、B、C、AGPR).

2.3.1 典型草原

典型草原内有显著差异的发酵参数和气体成分(表2)

表 1 4种类型草场优势牧草常规营养成分分析^{a)}

Table 1 Analysis of basic nutrient composition of dominant forages

项目(%)	典型草原			荒漠草原			草甸草原			高寒草甸			SEM	P值	玉米
	<i>As</i>	<i>Lc</i>	<i>Sg</i>	<i>Af</i>	<i>Cs</i>	<i>Sb</i>	<i>Lc1</i>	<i>At</i>	<i>Ts</i>	<i>Sa</i>	<i>Fr</i>	<i>Al</i>			
CP	9.50 ^d	8.99 ^c	9.50 ^d	12.88 ^b	14.52 ^a	12.95 ^b	7.78 ^f	10.03 ^c	10.04 ^c	6.73 ^s	5.63 ^h	5.33 ⁱ	0.019	0.010	8.60
EE	3.06 ^{de}	3.98 ^b	2.83 ^{ef}	2.96 ^c	2.27 ^s	3.65 ^c	5.85 ^a	3.02 ^c	2.16 ^g	2.66 ^f	1.67 ^h	3.30 ^d	0.025	0.010	4.70
NDF	66.85 ^c	70.24 ^a	68.90 ^b	56.97 ^f	65.17 ^d	64.08 ^e	67.21 ^c	39.59 ^b	45.82 ^s	67.35 ^c	64.85 ^{de}	65.21 ^d	1.090	0.031	9.52
ADF	34.21 ^c	33.66 ^{cd}	35.38 ^b	40.34 ^a	33.89 ^c	32.33 ^c	34.54 ^{bc}	26.10 ^b	31.16 ^{fg}	31.99 ^{ef}	32.95 ^{de}	30.66 ^s	0.098	0.010	2.34

a) 同行数据肩标相同小写字母表示差异不显著($P>0.05$), 不同小写字母表示差异显著($P<0.05$). 下同. 典型草原: 羊草(*Lc*), 羽茅(*As*), 大针茅(*Sg*); 荒漠草原: 短花针茅(*Sb*), 无芒隐子草(*Cs*), 冷蒿(*Af*); 草甸草原: 羊草(*Lc1*), 裂叶蒿(*At*), 展枝唐松草(*Ts*); 高寒草甸: 异针茅(*Sa*), 紫羊茅(*Fr*), 矮蒿(*Al*). P值仅是牧草间分析

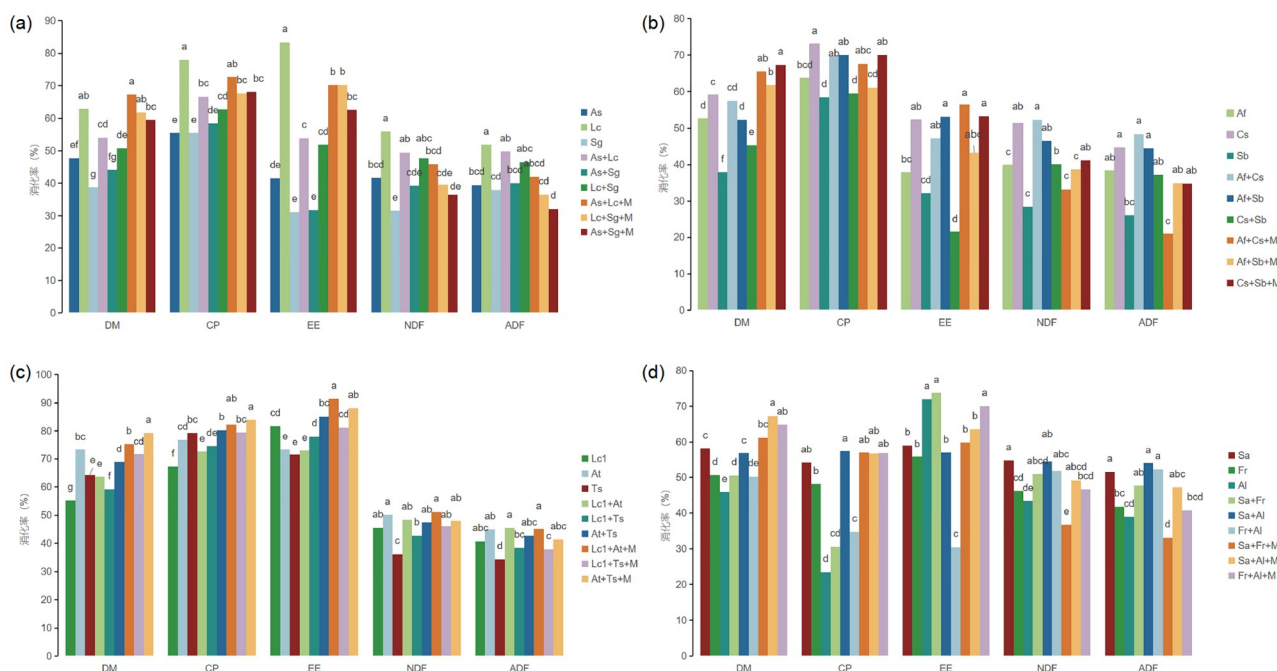


图 1 4种类型草场优势牧草及其组合营养物质消化率. (a) 典型草原; (b) 荒漠草原; (c) 草甸草原; (d) 高寒草甸. 图中肩标相同小写字母表示差异不显著($P>0.05$), 不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)

Figure 1 Nutrient digestibility of dominant forages and their combinations in four types of grasslands. (a) Typical grassland; (b) desert grassland; (c) meadow grassland; and (d) alpine meadow. Shoulder labeling with the same lowercase letter indicates a non-significant difference ($P>0.05$), while different lowercase letters indicate a significant difference ($P<0.05$)

结果显示, 在牧草组合基础上添加玉米使各组丁酸含量得到显著升高($P<0.01$); 羽茅(*As*)+*Sg*组合添加玉米后戊酸含量较*As*+*Sg*组合显著提高26.61%($P<0.05$). 各组 CH_4 和 CO_2 占比存在极显著差异($P<0.01$); 与玉米混合发酵的三组所产气体中 CH_4 占比显著高于其他各组($P<0.01$), CO_2 占比显著低于其他组($P<0.01$), 其中*Lc*+*Sg*组合添加玉米后 CH_4 占比最高.

产气动力学参数(表2)结果显示, *As*+*Lc*组合添加玉米可显著提高 GP_{72} 、 $AGPR$ ($P<0.05$). 牧草组合添加玉

米可显著提高B值($P<0.05$), 对 GP_{48} 、A值无显著性差异. 对于C值, *Lc*+*Sg*组合添加玉米后显著高于*Lc*+*Sg*组合($P<0.05$). 各组在各时间点产气量的动态变化呈先快后慢的升高趋势, 最后趋于平缓(图2(a)).

2.3.2 荒漠草原

荒漠草原内有显著性差异的发酵参数和气体成分(表3)结果显示, 48 h发酵液中 NH_3 -N浓度为14.58~24.44 mg/100 mL, 冷蒿(*Af*)+短花针茅(*Sb*)组合 NH_3 -N浓度相比*Sb*显著降低22.38%($P<0.05$), 且其组合添加玉

表 2 典型草原优势牧草组合体外发酵参数、气体成分及产气量

Table 2 *In vitro* fermentation parameters, gas composition and gas production of dominant grass combinations in typical steppe

项目	As	Lc	Sg	As+Lc	As+Sg	Lc+Sg	As+Lc+M	As+Sg+M	Lc+Sg+M	SEM	P值
发酵参数											
丁酸(mmol/L)	5.46 ^b	5.22 ^b	5.65 ^b	5.68 ^b	5.18 ^b	5.62 ^b	9.06 ^a	9.38 ^a	9.29 ^a	0.694	0.001
异戊酸(mmol/L)	1.79 ^{ab}	1.54 ^b	2.07 ^a	1.88 ^{ab}	1.68 ^{ab}	1.83 ^{ab}	1.98 ^{ab}	2.15 ^a	2.17 ^a	0.218	0.115
戊酸(mmol/L)	0.82 ^{bc}	0.75 ^c	0.89 ^{abc}	0.88 ^{abc}	0.80 ^{bc}	0.87 ^{abc}	1.04 ^{ab}	1.09 ^a	1.12 ^a	0.108	0.025
CH ₄ (%)	17.27 ^b	15.46 ^b	14.85 ^b	17.32 ^b	15.00 ^b	15.95 ^b	21.90 ^a	21.07 ^a	22.08 ^a	1.604	0.001
CO ₂ (%)	82.73 ^a	84.54 ^a	85.12 ^a	82.68 ^a	85.00 ^a	84.05 ^a	78.09 ^b	78.91 ^b	77.90 ^b	1.601	0.001
产气动力学参数											
GP ₇₂ (mL/gDM)	107.79 ^b	116.36 ^b	112.07 ^b	117.40 ^b	100.43 ^b	118.83 ^b	142.91 ^a	130.82 ^{ab}	128.93 ^{ab}	2.561	0.020
GP ₄₈ (mL/gDM)	104.56 ^b	113.32 ^b	104.56 ^b	118.21 ^{ab}	99.19 ^b	118.50 ^{ab}	138.9 ^a	126.04 ^b	126.57 ^b	2.668	0.034
B	0.96 ^b	0.94 ^b	0.78 ^c	0.98 ^b	0.85 ^b	0.98 ^b	1.29 ^a	1.29 ^a	1.29 ^a	0.016	0.001
C(h)	10.13 ^c	9.57 ^c	25.85 ^a	10.88 ^{bc}	15.48 ^{bc}	16.80 ^b	7.57 ^c	8.02 ^c	8.53 ^c	0.684	0.001
AGPR(mL/(g h))	3.75 ^c	3.89 ^c	2.72 ^c	3.72 ^c	3.05 ^c	3.24 ^c	7.04 ^a	6.40 ^{ab}	5.45 ^b	0.171	0.001

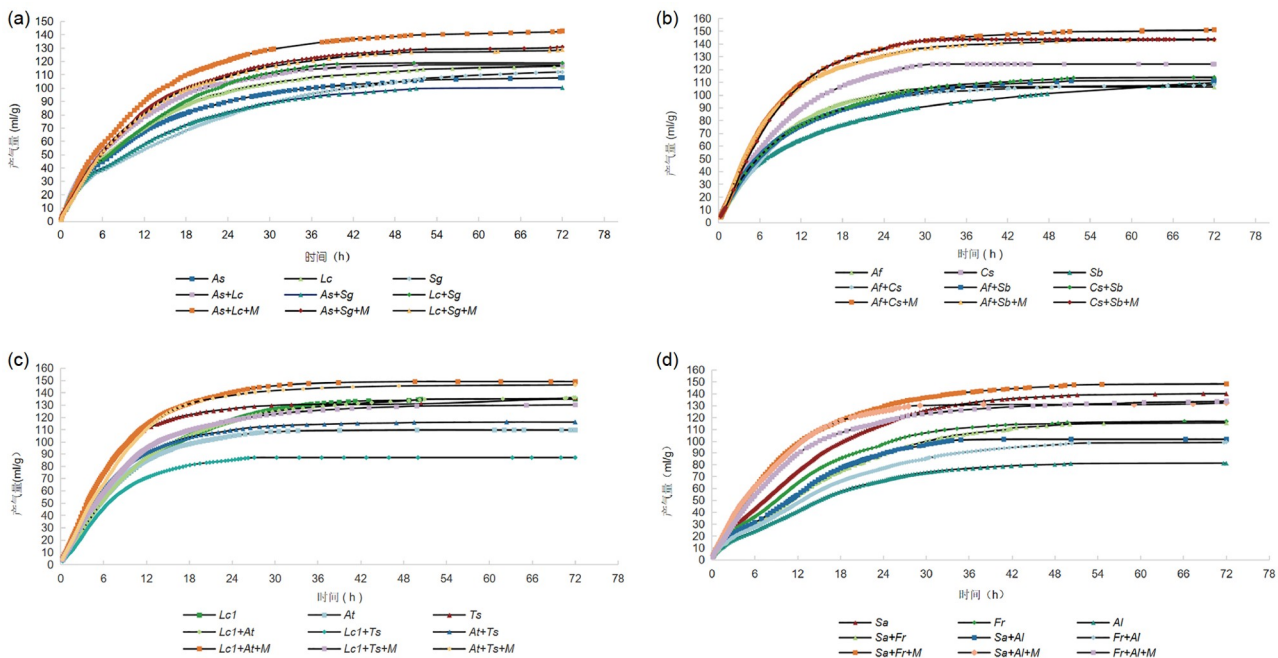


图 2 4种类型草场优势牧草及其组合体外发酵产气曲线。(a) 典型草原; (b) 荒漠草原; (c) 草甸草原; (d) 高寒草甸
Figure 2 *In vitro* fermentation gas production curves of dominant forages and their combinations in four grassland types. (a) Typical steppes; (b) desert steppes; (c) meadow steppes; and (d) alpine steppes

米后NH₃-N浓度再次显著降低23.14%($P<0.05$)。各组总挥发酸含量存在显著差异($P=0.027$)，无芒隐子草(*Cs*) +*Sb*组合添加玉米后TVFA、乙酸和丙酸含量显著高于*Cs*+*Sb*组合($P<0.05$)。添加玉米可使各组发酵液中丁酸含量显著升高($P<0.01$)，其中*Cs*+*Sb*组合添加玉米后最高。此外，*Sb*发酵所产气体中H₂占比显著高于其他牧草($P<0.01$)。

产气动力学参数(表3)结果显示，牧草组合添加玉米后可显著提高GP₇₂、AGPR($P<0.05$)；*Af*+*Cs*组合添加玉米后GP₄₈及A值较*Af*+*Cs*组合显著增加($P<0.05$)。*Af*+*Sb*组合添加玉米可显著提高A值、C值($P<0.05$)。*Cs*+*Sb*组合添加玉米可显著提高B值、C值($P<0.05$)。各牧草组合在各时间点产气量的动态变化(图2(b))，均呈先快后慢升高，最后趋于平缓的趋势。

表3 荒漠草原优势牧草及其组合体外发酵参数、气体成分及产气量

Table 3 *In vitro* fermentation parameters, gas composition and gas production of dominant forages and their combinations in desert steppe

项目	<i>Af</i>	<i>Cs</i>	<i>Sb</i>	<i>Af+Cs</i>	<i>Af+Sb</i>	<i>Cs+Sb</i>	<i>Af+Cs+M</i>	<i>Af+Sb+M</i>	<i>Cs+Sb+M</i>	SEM	<i>P</i> 值
发酵参数											
NH ₃ -N(mg/100 mL)	20.97 ^{ab}	23.57 ^a	24.44 ^a	20.84 ^{ab}	18.97 ^b	21.33 ^{ab}	17.55 ^{bc}	14.58 ^c	21.02 ^{ab}	1.911	0.002
乙酸(mmol/L)	40.74 ^b	41.86 ^b	35.32 ^b	45.86 ^{ab}	40.87 ^b	35.96 ^b	45.21 ^{ab}	48.51 ^{ab}	57.63 ^a	5.768	0.033
丙酸(mmol/L)	10.42 ^{bc}	11.53 ^{abc}	8.68 ^c	12.38 ^{ab}	10.94 ^{abc}	9.88 ^{bc}	12.12 ^{abc}	11.89 ^{abc}	14.31 ^a	1.465	0.054
丁酸(mmol/L)	5.15 ^c	5.97 ^c	5.32 ^c	5.30 ^c	5.14 ^c	5.46 ^c	8.09 ^b	9.01 ^{ab}	10.39 ^a	0.896	<0.001
TVFA(mmol/L)	60.48 ^{bc}	63.47 ^{bc}	53.11 ^c	67.30 ^{bc}	60.70 ^{bc}	55.24 ^{bc}	69.28 ^{abc}	73.64 ^{ab}	87.18 ^a	8.573	0.027
氢气(%)	0.012 ^b	0.016 ^b	0.248 ^a	0.016 ^b	0.038 ^b	0.077 ^b	0.015 ^b	0.014 ^b	0.016 ^b	0.046	0.001
产气动力学参数											
GP ₇₂ (mL/gDM)	106.45 ^c	124.24 ^{bc}	110.34 ^c	108.17 ^c	111.55 ^c	113.91 ^c	151.26 ^a	143.62 ^{ab}	149.71 ^a	2.393	<0.001
GP ₄₈ (mL/gDM)	106.45 ^{bc}	124.24 ^b	101.21 ^c	106.20 ^{bc}	109.53 ^{bc}	112.20 ^{bc}	148.98 ^a	141.83 ^{ab}	143.62 ^{ab}	2.380	<0.001
A(mL/gDM)	118.46 ^b	148.62 ^{ab}	136.74 ^b	132.91 ^b	129.89 ^{cd}	140.03 ^{ab}	165.16 ^a	158.80 ^{ab}	164.57 ^a	3.013	0.011
B	1.34 ^{ab}	1.21 ^b	0.94 ^c	1.27 ^b	1.14 ^b	1.02 ^c	1.37 ^{ab}	1.30 ^{ab}	1.42 ^a	0.019	<0.001
C(h)	6.75 ^c	9.17 ^b	11.18 ^a	7.43 ^c	8.26 ^{bc}	10.06 ^{ab}	5.94 ^c	5.61 ^d	6.74 ^c	0.189	<0.001
AGPR(mL/(g h))	5.99 ^b	4.94 ^{bc}	2.92 ^c	5.80 ^b	4.75 ^b	3.58 ^c	9.62 ^a	9.27 ^a	8.70 ^a	0.340	<0.001

2.3.3 草甸草原

草甸草原内有显著性差异的发酵参数和气体成分(表4)结果显示, 48 h发酵液中NH₃-N浓度为13.86~23.16 mg/100 mL, 羊草(*Lcl*)+展枝唐松草(*Ts*)组合的NH₃-N浓度较*Ts*显著提高42.42%, 较*Lcl*显著降低17.76%(*P*<0.05)。裂叶蒿(*At*)+*Ts*组合的TVFA、乙酸、丙酸含量显著高于*At*(*P*<0.05), 乙酸/丙酸比值显著高于*Ts*(*P*<0.05)。牧草组合添加玉米使各组异丁酸含量均有所升高(*P*<0.05), *Lcl*+*At*组合添加玉米后丁酸、戊酸及异戊酸浓度显著高于所有牧草组合(*P*<0.05)。 *At*+*Ts*组合添加玉米后丁酸和异戊酸浓度显著高于所有牧草组合(*P*<0.05)。发酵气体成分组成方面, *Lcl*+*Ts*组合发酵产生气体中CH₄占比显著高于*Ts*(*P*<0.05); *At*+*Ts*组合添加玉米后的CH₄含量显著高于*At*+*Ts*组合(*P*<0.05), CO₂占比结果反之。

产气动力学参数(表4)结果显示, 对于GP₇₂、AGPR, *Lcl*+*Ts*组合添加玉米后显著高于*Lcl*+*Ts*的牧草组合(*P*<0.05)。对于GP₄₈, *Lcl*+*At*组合添加玉米后显著高于*Lcl*+*At*组合(*P*<0.05)。组合玉米对A、B和C值无显著性影响。各组在各时间点产气量的动态变化(图2(c)), 均呈先快后慢升高, 直至平缓的趋势。

2.3.4 高寒草甸

高寒草甸内有显著性差异的发酵参数和气体成分(表5)结果显示, 48 h发酵液中NH₃-N浓度为12.89~18.17 mg/100 mL, 异针茅(*Sa*)+紫羊茅(*Fr*)组合添加玉

米后NH₃-N浓度较*Sa*+*Fr*组合显著降低40.81%(*P*<0.05), 而乙酸/丙酸显著升高(*P*<0.05); 通过添加玉米, 各牧草组合丁酸含量均显著提高(*P*<0.01)。发酵气体组成方面, 各组间所产气体中H₂、CH₄和CO₂占比均无显著差异。

产气动力学参数(表5)结果显示, 各牧草组合添加玉米后AGPR显著提高(*P*<0.05), 且*Sa*+*Fr*、*Sa*+*Al*组合C值显著降低(*P*<0.05)。各组在各时间点产气量的动态变化(图2(d)), 均呈先快速升高, 再缓慢升高, 最后趋于平缓的趋势。

2.4 不同类型草场优势牧草组合效应指数

组合效应指数(表6)结果显示, 典型草原中, 羽茅(*As*)与羊草(*Lc*)、*Lc*与大针茅(*Sg*)组合分别添加玉米后MFAEI均表现正组合效应, 其中牧草组合中*As*+*Lc*组合的MFAEI值最大, 各牧草组合添加玉米同样为*As*+*Lc*组合最大; 荒漠草原中, 冷蒿(*Af*)与无芒隐子草(*Cs*)、*Af*与短花针茅(*Sb*)两牧草组合及其在添加玉米后MFAEI均表现为正组合效应, 添加玉米的组合中*Cs*+*Sb*组合MFAEI最大; 草甸草原中, 羊草(*Lcl*)+裂叶蒿(*At*)组合、*At*+展枝唐松草(*Ts*)组合、*Lcl*+*At*组合添加玉米及*At*+*Ts*组合添加玉米的MFAEI表现正组合效应, 其中牧草组合中*At*+*Ts*组MFAEI值最大, 添加玉米后同样为*At*+*Ts*组合最大, *Lcl*+*Ts*组合添加玉米后依旧表现为负组合效应; 高寒草甸中, 除异针茅(*Sa*)+紫羊茅(*Fr*)组合及其添加玉米外, 其他组合MFAEI均表现正组合效应。

表 4 草甸草原优势牧草及其组合体外发酵参数、气体成分及产气量

Table 4 *In vitro* fermentation parameters, gas composition and gas production of dominant pasture grasses and their combinations in meadow steppe

项目	<i>Lcl</i>	<i>At</i>	<i>Ts</i>	<i>Lcl+At</i>	<i>Lcl+Ts</i>	<i>At+Ts</i>	<i>Lcl+At+M</i>	<i>Lcl+Ts+M</i>	<i>At+Ts+M</i>	SEM	<i>P</i> 值
发酵参数											
NH ₃ -N (mg/100 mL)	23.16 ^a	17.19 ^{bc}	13.86 ^c	18.61 ^{bc}	19.74 ^{ab}	15.87 ^{bc}	17.99 ^{bc}	15.80 ^{bc}	17.25 ^{bc}	2.047	0.015
丙酸(mmol/L)	14.58 ^a	7.71 ^b	14.31 ^a	13.31 ^a	13.91 ^a	16.02 ^a	15.34 ^a	13.45 ^a	14.36 ^a	1.954	0.025
丁酸(mmol/L)	6.67 ^{bc}	4.01 ^d	7.20 ^{bc}	6.08 ^{cd}	6.70 ^{bc}	7.37 ^{bc}	10.92 ^a	8.95 ^{ab}	10.02 ^a	1.102	0.001
异丁酸(mmol/L)	0.92 ^{abc}	0.60 ^c	0.70 ^{bc}	0.88 ^{abc}	0.95 ^{abc}	0.83 ^{abc}	1.14 ^a	1.06 ^{ab}	1.12 ^a	0.158	0.041
异戊酸(mmol/L)	1.78 ^{abc}	1.17 ^c	1.44 ^c	1.65 ^{bc}	1.85 ^{abc}	1.62 ^{bc}	2.47 ^a	2.29 ^{ab}	2.43 ^a	0.304	0.004
戊酸(mmol/L)	1.00 ^{ab}	0.53 ^c	1.03 ^{ab}	0.87 ^b	1.06 ^{ab}	0.92 ^{ab}	1.27 ^a	1.17 ^{ab}	1.19 ^{ab}	0.157	0.008
TVFA(mmol/L)	76.04 ^a	46.42 ^b	68.16 ^{ab}	73.48 ^{ab}	76.54 ^a	88.97 ^a	92.31 ^a	78.30 ^a	86.35 ^a	12.279	0.053
乙酸/丙酸	3.49 ^{ab}	4.11 ^a	3.09 ^b	3.78 ^a	3.72 ^a	3.90 ^a	3.99 ^a	3.80 ^a	3.98 ^a	0.274	0.045
氢气(%)	0.018 ^{bc}	0.017 ^{bc}	0.032 ^{ab}	0.019 ^{bc}	0.018 ^{bc}	0.029 ^{abc}	0.041 ^a	0.015 ^c	0.024 ^{bc}	0.007	0.019
CH ₄ (%)	19.26 ^a	15.99 ^{bc}	13.30 ^d	17.02 ^{ab}	17.47 ^{ab}	14.46 ^{cd}	18.78 ^a	17.54 ^{ab}	19.02 ^a	1.142	0.001
CO ₂ (%)	80.72 ^d	83.99 ^{bc}	86.67 ^a	82.96 ^{cd}	82.51 ^{cd}	85.52 ^{ab}	81.18 ^d	82.45 ^{cd}	80.96 ^d	1.142	0.001
产气动力学参数											
GP ₇₂ (mL/gDM)	134.83 ^{ab}	109.89 ^{bc}	135.75 ^{ab}	136.27 ^{ab}	87.04 ^c	116.42 ^{ab}	149.10 ^a	130.35 ^{ab}	146.54 ^a	3.814	0.016
GP ₄₈ (mL/gDM)	133.93 ^{ab}	109.89 ^b	131.20 ^{ab}	133.64 ^{ab}	87.03 ^b	116.05 ^b	149.01 ^a	129.35 ^{ab}	145.64 ^{ab}	3.765	0.018
A(mL/gDM)	172.59 ^a	124.85 ^b	149.70 ^{ab}	154.68 ^{ab}	101.36 ^b	136.19 ^b	170.69 ^{ab}	146.59 ^{ab}	166.70 ^{ab}	4.012	0.004
B	1.14 ^c	1.71 ^a	1.51 ^{ab}	1.29 ^b	1.60 ^{ab}	1.43 ^b	1.34 ^b	1.56 ^{ab}	1.49 ^{ab}	0.031	0.007
C(h)	11.88 ^a	5.68 ^c	4.99 ^c	8.79 ^b	5.32 ^c	5.65 ^c	6.12 ^c	5.370 ^c	6.51 ^c	0.198	0.001
AGPR(mL/(g h))	4.14 ^c	9.49 ^{ab}	11.44 ^a	5.71 ^b	7.48 ^b	8.64 ^{ab}	9.47 ^{ab}	11.11 ^a	9.85 ^{ab}	0.340	0.001

表 5 高寒草甸优势牧草及其组合体外养分消化率、发酵参数、气体成分及产气量

Table 5 *In vitro* nutrient digestibility, fermentation parameters, gas composition and gas production of dominant pasture grasses and their combinations in alpine steppe

项目	<i>Sa</i>	<i>Fr</i>	<i>Al</i>	<i>Sa+Fr</i>	<i>Sa+Al</i>	<i>Fr+Al</i>	<i>Sa+Fr+M</i>	<i>Sa+Al+M</i>	<i>Fr+Al+M</i>	SEM	<i>P</i> 值
发酵参数											
NH ₃ -N(mg/100 mL)	15.76 ^{ab}	14.75 ^{ab}	14.52 ^{ab}	18.15 ^a	18.17 ^a	18.11 ^a	12.89 ^b	15.25 ^{ab}	15.54 ^{ab}	1.678	0.052
丁酸(mmol/L)	5.71 ^b	5.96 ^b	5.05 ^b	6.17 ^b	5.93 ^b	5.41 ^b	9.52 ^a	8.05 ^a	8.53 ^a	0.765	<0.001
戊酸(mmol/L)	0.77 ^{bc}	0.78 ^{bc}	0.72 ^c	0.87 ^{abc}	0.83 ^{bc}	0.76 ^{bc}	1.05 ^a	0.94 ^{abc}	0.96 ^{ab}	0.097	0.041
产气动力学参数											
GP ₇₂ (mL/gDM)	140.13 ^a	116.90 ^{ab}	81.36 ^b	115.69 ^{ab}	101.90 ^b	99.70 ^b	148.32 ^a	132.49 ^{ab}	133.96 ^{ab}	4.276	0.018
GP ₄₈ (mL/gDM)	138.34 ^{ab}	115.46 ^{ab}	80.22 ^b	114.17 ^{ab}	101.89 ^b	97.60 ^b	146.55 ^a	131.02 ^{ab}	130.79 ^{ab}	4.251	0.020
A(mL/gDM)	186.98 ^a	150.10 ^{ab}	98.84 ^b	154.25 ^{ab}	128.54 ^b	119.13 ^b	170.81 ^{ab}	147.82 ^{ab}	158.19 ^{ab}	5.600	0.032
C(h)	16.40 ^{ab}	14.33 ^{ab}	11.27 ^{bc}	17.32 ^a	13.42 ^b	12.26 ^{bc}	8.40 ^c	7.60 ^c	8.62 ^c	0.429	0.001
AGPR(mL/(g h))	3.20 ^b	3.04 ^b	3.14 ^b	2.56 ^b	3.09 ^b	3.06 ^b	6.43 ^a	6.93 ^a	5.85 ^a	0.205	0.001

3 讨论

3.1 不同类型草场优势牧草及其组合对营养物质消化率的影响

牧草消化率决定着天然草地由牧草到畜产品的转化效率,能够反映饲料在瘤胃内被消化的难易程度,可

影响反刍动物采食量^[20]. 本研究中4种类型草原中的单一牧草DMD在37.91%~73.23%之间. 这与前人研究的13种牧草48 h瘤胃体外DMD及高寒草甸牧草不同季节的体外DMD数值范围(34.34%~75.64%)类似^[21]. DMD主要受饲料中纤维物质和粗蛋白质含量的影响,纤维物质含量越高,饲料DMD越低^[22]. 饲料中粗蛋白质含

表 6 4种类型草场优势牧草组合效应指数

Table 6 Combination effect indices of dominant grasses in four grasslands

项目	SFAEI								MFAEI
	DMD	CPD	EED	NDFD	ADFD	NH ₃ -N	TVFAs	GP ₇₂	
典型草原									
<i>As+Lc</i>	0.023	0.000	0.137	0.016	0.089	0.094	0.042	0.074	0.156
<i>As+Sg</i>	0.018	0.053	0.123	0.073	0.033	0.024	-0.105	0.136	-0.211
<i>Lc+Sg</i>	0.001	0.060	0.095	0.090	0.036	0.014	0.020	0.062	0.067
<i>As+Lc+M</i>	0.018	\	\	\	\	0.095	-0.012	0.427	0.492
<i>As+Sg+M</i>	0.024	\	\	\	\	-0.104	-0.001	0.325	0.244
<i>Lc+Sg+M</i>	-0.091	\	\	\	\	-0.072	-0.017	0.269	0.089
荒漠草原									
<i>Af+Cs</i>	0.030	0.018	0.047	0.148	0.167	-0.064	0.086	-0.062	0.369
<i>Af+Sb</i>	0.156	0.147	0.520	0.360	0.380	-0.165	0.069	0.029	1.496
<i>Cs+Sb</i>	-0.065	-0.095	-0.491	0.006	0.052	-0.111	-0.052	-0.029	-0.786
<i>Af+Cs+M</i>	-0.047	\	\	\	\	-0.178	0.070	0.171	0.016
<i>Af+Sb+M</i>	0.000	\	\	\	\	-0.326	0.202	0.153	0.029
<i>Cs+Sb+M</i>	0.054	\	\	\	\	-0.066	0.400	0.148	0.536
草甸草原									
<i>LcI+At</i>	-0.009	0.009	-0.059	0.011	0.062	-0.078	0.200	0.114	0.250
<i>LcI+Ts</i>	-0.010	0.020	0.020	0.046	0.023	0.066	0.062	-0.357	-0.129
<i>At+Ts</i>	0.001	0.028	0.177	0.096	0.078	0.022	0.553	-0.052	0.903
<i>LcI+At+M</i>	0.013	\	\	\	\	-0.098	0.437	0.114	0.466
<i>LcI+Ts+M</i>	0.003	\	\	\	\	-0.161	0.095	-0.085	-0.148
<i>At+Ts+M</i>	0.025	\	\	\	\	0.024	0.402	0.092	0.543
高寒草甸									
<i>Sa+Fr</i>	-0.071	-0.401	0.285	0.008	0.020	0.190	-0.017	-0.100	-0.086
<i>Sa+Al</i>	0.092	0.479	0.130	0.110	0.193	0.200	0.103	0.080	0.966
<i>Fr+Al</i>	0.042	0.029	0.523	0.157	0.295	0.237	-0.002	0.006	0.183
<i>Sa+Fr+M</i>	0.097	\	\	\	\	0.227	-0.002	0.075	-0.251
<i>Sa+Al+M</i>	0.017	\	\	\	\	0.081	0.178	0.051	0.165
<i>Fr+Al+M</i>	0.019	\	\	\	\	0.044	0.101	0.132	0.207

量越高, DMD则越高^[23]。纤维物质有利于反刍动物瘤胃发酵维持内环境稳定, 同时也会提供动物生长和生产所需能量^[24], 因此其消化指标NDFD和ADFD也常视为评定牧草等粗饲料营养价值的重要指标^[25]。本试验中, 不同类型草原中牧草组合可在不同程度上提高牧草的DMD、ADFD及NDFD, 而牧草组合添加玉米后纤维含量相对降低, ADFD及NDFD降低, DMD升高, 说明牧草组合后可提高牧草干物质及纤维消化率, 而牧草组合添加玉米虽可提高DMD但降低了牧草纤维物质的消化率。这可能是因为牧草组合后不同牧草纤维素和木质素的组成和比例得到平衡, 使牧草利用率得到改善^[26]。而牧草组合添加玉米后微生物发酵模式

由发酵牧草转变成同时发酵牧草和玉米, 从而抑制发酵牧草的部分微生物, 使得牧草利用率降低^[27]。

此外, 粗蛋白质是评定牧草品质的重要指标, 其蛋白结构、物理化学特性, 牧草细胞壁微生物特性及营养结构都会影响CPD从而影响DMD^[28]。饲料中粗蛋白质含量越高时, 其CPD相应越高, DMD越高^[29]。本研究结果显示, 荒漠草原、草甸草原、高寒草甸3个草场牧草CPD与粗蛋白质含量呈相同增减趋势, 典型草原牧草CPD与粗蛋白质含量则呈相反增减趋势。可能与典型草原中牧草的消化利用情况有关。另外, 4种类型草原内牧草组合、牧草组合添加玉米后均提高了CPD和DMD。综上, 不同类型草原内牧草组合及添加玉米均可

提高DMD及CPD, 而牧草组合会提高纤维物质的消化率, 添加玉米则会降低纤维物质的消化率. 因此, 生产实践中, 可通过低质量牧草组合、或低质量牧草与玉米组合提高牲畜干物质消化率促进动物生产性能, 而放牧情况下也可通过补饲方式提高放牧动物对有机物质的利用率.

3.2 不同类型草场优势牧草及其组合对发酵参数及其气体成分的影响

3.2.1 氨态氮浓度

$\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度是衡量瘤胃微生物对饲料蛋白利用的重要指标, 同时也会影响机体的生长发育^[30]. 饲料中蛋白质经瘤胃微生物降解, $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度升高. 氨态氮经微生物利用合成微生物蛋白, 瘤胃中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度降低. 因此, $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度处于动态平衡中, 适宜的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度是确保瘤胃微生物蛋白质正常合成的先决条件^[31]. 本研究中4个草场发酵的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度在12.89~24.44 mg dL^{-1} 之间, 在瘤胃 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度正常范围6.3~27.5 mg dL^{-1} 之内^[32,33], 不会影响微生物生长和正常代谢活动^[34].

本试验4个草场牧草及其组合 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度与蛋白质含量呈正相关趋势, 且随着牧草组合CPD升高, 其 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度也有所提升. 通过观察 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度的SFAEI值发现, 典型草原中, 羽茅与羊草组合、羊草与大针茅组合及羽茅与羊草组合添加玉米均表现为正组合效应, 有利于蛋白质的消化利用; 荒漠草原中, 各组合均表现为负组合效应; 草甸草原中, 羊草与裂叶蒿组合、裂叶蒿与展枝唐松草组合及裂叶蒿与展枝唐松草组合添加玉米均表现为正组合效应, 其余为负组合效应, 其中羊草与裂叶蒿组合正组合效应最佳; 高寒草甸中, 优势牧草两两组合均表现出正组合效应, 而添加玉米后表现为负组合效应. 综上, 四种草原中牧草组合及添加玉米的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度的SFAEI值有正有负, 与上述CPD的结果不完全一致, 这可能与组合牧草或添加玉米使得饲料能量水平升高有关, 从而促进微生物生长, 加快蛋白质消化和氨态氮的利用, 当两者不平衡时, 则表现为 $\text{NH}_3\text{-N}$ 富集和消减现象^[8,9], 但浓度始终维持在保证瘤胃微生物蛋白质合成的正常浓度范围, 因此, 在放牧或放牧补饲时要考虑动物的能量需求, 不能过度补饲造成能量浪费.

3.2.2 挥发性脂肪酸浓度

VFA是反刍动物机体中的主要供能物质, 且占总能量的70%以上, 能反映动物瘤胃微生物活性的强弱

和代谢^[35]. 饲料中的碳水化合物等经瘤胃发酵可产生VFA, 不同发酵底物其发酵产生的瘤胃环境不同, 组合提供更多的氮和不同的化学物质, 进而发酵产生的VFA(乙酸、丙酸和丁酸等)组成和结构不同, 从而促进瘤胃微生物的生长和发酵^[36~39]. 由于反刍动物吸收VFA时遵循丁酸>丙酸>乙酸的规律^[40], 一般瘤胃VFA组成中, 乙酸浓度最高, 其次为丙酸, 丁酸浓度较低, 本研究发酵液VFA浓度与此规律一致. 在反刍动物机体中, 乙酸和丙酸分别是反刍家畜合成乳脂和乳蛋白的前体物, 丁酸是脂肪合成的前体物^[41]. 有研究表明, 饲料营养成分中碳水化合物的组成结构不同, 瘤胃VFA产量也不同^[42]. 本试验结果显示, 四种类型草场中优势牧草通过两两组合未显著影响其乙酸、丙酸、丁酸及TVFA浓度, 这可能与各类型草场内优势牧草间营养物质含量相似有关, 组合后饲料营养物质组成结构并未显著改变. 但玉米的添加改变饲料营养物质组成结构, 提高淀粉等非纤维性碳水化合物含量, 使得VFA浓度高于单一牧草及其组合, 其中丁酸浓度显著升高, 有利于脂肪合成.

反刍动物瘤胃内饲料支链氨基酸通过微生物氧化脱氨基和脱羧基作用形成异位酸^[43]. 而异丁酸、异戊酸和戊酸等异位酸能够显著促进瘤胃纤维降解菌的生长^[44], 有效促进反刍动物的瘤胃发酵, 增加瘤胃内的乙酸和TVFA含量^[45]. 本试验中, 四种草场类型中单一牧草两两组合后异位酸浓度未见显著变化, 但相较单一饲草略有升高; 值得关注的是, 玉米的添加使得牧草发酵异位酸浓度显著升高, 4种草场类型均呈现升高趋势, 其有利于瘤胃发酵, 从而也影响TVFA含量的变化, 一定程度上反映了更多的蛋白质或微生物蛋白质被降解^[46]. 此外, AA/PA反映了瘤胃发酵的类型^[47]. 发酵底物富含纤维性碳水化合物利于乙酸发酵, 丙酸发酵底物主要是非纤维性碳水化合物^[48]. 本试验中, 四种类型草场试验组AA/PA均大于3, 属于乙酸发酵类型, 有利于反刍动物脂肪合成, 促进第一性生产力向第二性生产力转化. 综上, 相对于单一牧草, 牧草组合不会影响短链脂肪酸的浓度, 但是添加玉米后发酵底物结构发生改变, 导致丁酸、异位酸等短链脂肪酸的含量得到提高.

3.2.3 气体组成比例

反刍动物甲烷排放量主要受日粮组成的影响, 与纤维含量密切相关^[49]. 当日粮中纤维含量增加时, 纤维分解菌增殖, 产生乙酸和丁酸释放氢气, 氢气分压增加

会抑制NADH脱氢酶的功能, 甲烷产生量增加^[50]。本研究主要计算气体组成中CH₄、CO₂及H₂占其总和的百分比, 结果表明, 综合四种草场结果显示, 牧草组合对发酵产生的气体比例没有显著性影响, 而组合玉米后甲烷所占比例均在不同程度上增加, 其中, 典型草原中牧草组合添加玉米后甲烷比例显著提高。该趋势与丁酸含量变化趋势相似, 说明添加玉米后丁酸过度积累可能会导致甲烷含量增加, 这可能是因为高负荷厌氧消化时, 丁酸可被丁酸产甲烷菌系氧化为乙酸和H₂、CO₂, 最终被产甲烷菌转化为CH₄^[51]。

3.3 不同类型草场优势牧草及其组合对产气动力学参数的影响

发酵底物产生的气体源于发酵底物中的碳水化合物和粗蛋白质, 很多研究表示, 产气量与牧草中粗蛋白质含量和瘤胃微生物活性呈正相关关系, 与纤维物质含量呈负相关关系, 间接反映瘤胃微生物活性和饲料发酵水平^[52,53]。饲料有机物消化率与产气量显著相关, 有机物消化率越大, 产气量越高。同时, 体外模拟瘤胃发酵过程中, 最大产气量和产气速率是判断瘤胃发酵动力学的重要指标。

本试验中, 牧草组合及牧草组合添加玉米在各时间点产气量的动态变化, 呈0~12 h先快速升高, 12~24 h再缓慢升高, 24~48 h趋于平缓的趋势。这主要是由于瘤胃中细菌和真菌在发酵0~24 h微生物数量多, 发酵效果显著^[54]。对于GP₇₂、AGPR及B值, 典型草原中羽茅+羊草组合添加玉米后显著高于牧草组合, 这与上述其各种营养物质消化率结果一致, 原因是淀粉等非结构性碳水化合物可被机体快速利用, 而纤维类物质的致密结构阻碍了糖类营养物质的分解^[13], 说明典型草原中羽茅+羊草组合添加玉米相比于各种牧草组合更能提高有机物质的消化率。同样在荒漠草原中发现冷蒿+无芒隐子草组合添加玉米后相比优势牧草及其组合更能提高GP₇₂、A值及AGPR, 符合其营养物质消化率的规律。而草甸草原中, 对于GP₇₂, 裂叶蒿+展枝唐松草组合添加玉米后相较其牧草组合更高, 羊草+裂叶蒿组合添加玉米后可显著提高GP₄₈, 这与其DMD、CPD、粗脂肪及NDF消化率更高的结果趋势相符, 可能与其裂叶蒿、玉米中更高的粗蛋白质含量有关。此外, 高寒草甸中, 异针茅+紫羊茅组合添加玉米后GP₇₂较异针茅+紫羊茅组合有所提高, 这与其CPD显著高于异针茅+紫羊茅组合的结果一致。而异针茅+紫羊茅、

异针茅+矮蒿、紫羊茅+矮蒿三组添加玉米后AGPR显著高于其牧草组合。与本试验结果类似, 有研究利用体外产气法评价高寒草甸4种牧草与以玉米为主的精补料1:1组合后的发酵营养特性发现添加精补料均能有效提高牧草发酵的GP₄₈、A值及AGPR^[55]。综上, 4种草场类型中牧草组合基础上添加玉米较牧草组合及单一优势牧草能够提高有机物质的发酵和产气量, 这与玉米、牧草高的粗蛋白质含量有关, 牧草与玉米组合一定程度上可达到瘤胃发酵能氮平衡, 从而提高瘤胃微生物活性, 进而促进了微生物对有机物的分解能力^[56]。此外, 高寒草甸结果或可为高寒地区较长冷季缺乏天然牧草且其营养较低的情况提供正向的饲养策略。

3.4 不同类型草场优势牧草组合效应

饲料原料间存在着广泛的组合效应, 利用饲料之间的正组合效应可提高饲料利用率和改善生长性能^[57]。单项组合效应指数(SFAEI)能以某一指标评估饲料间的组合效应, 但组合效应机制极其复杂, 仅从某一指标判断缺乏代表性^[58]。为此, 卢德勋^[59]根据体外产气法不同时间点测定的各项指标, 提出饲料AE综合评价指标体系——MFAEI, 综合评定饲料间的组合效应。本试验计算了DMD、NH₃-N、VFA和GP等指标的单项组合效应指数, 并通过MFAEI综合考虑了各因素对饲料间组合效应的影响, 更加准确全面的评价其组合效应。

4种类型草场所在地区气候、降水量不同形成适宜当地环境生长的不同优势牧草, 进而影响着当地放牧家畜的生产性能。典型草原中, 牧草组合羊草+大针茅组合MFAEI值最大, 添加玉米后以羽茅+羊草组合最大, 说明典型草原中羊草对于其组合效应起主要作用, 可能与羊草(49.57%)在典型草原优势草中所占比例最高, 且其各种营养物质含量发酵效率较高有关; 荒漠草原中, 牧草组合只有冷蒿+短花针茅组合表现正组合效应, 添加玉米后以无芒隐子草+短花针茅组合最大, 短花针茅在组合效应值中起着主要的正向作用, 加之其在荒漠草原中占比达到70%, 蛋白质含量高, 放牧动物喜食^[60], 说明放牧条件下, 动物采食短花针茅的牧草组合或补饲玉米可能会提高放牧家畜的饲料消化率。

草甸草原中, 羊草+裂叶蒿组合、裂叶蒿+展枝唐松草组合、羊草+裂叶蒿组合添加玉米及裂叶蒿+展枝唐松草组合添加玉米的MFAEI表现正组合效应, 其中

牧草组合中裂叶蒿+展枝唐松草组合MFAEI值最大,添加玉米后以裂叶蒿+展枝唐松草组合最大,说明裂叶蒿与其他牧草组合可提高放牧动物的瘤胃降解率,作为草甸草原第二大优势牧草,裂叶蒿较第一大优势牧草羊草具有粗蛋白质含量高、纤维物质含量低的特点可能获得了放牧动物的喜食,从而可能会提高其饲料消化率及生产性能。但是羊草+展枝唐松草组合添加玉米后依旧表现为负组合效应,可能与展枝唐松草纤维含量高、适口性差以及难以消化有关;高寒草甸中,异针茅+紫羊茅组合表现为负组合效应,添加玉米后加剧了其负组合效应,这可能由于添加玉米后,能量水平提高导致能氮不平衡,其中牧草组合中异针茅+矮蒿组合MFAEI值最大,紫羊茅+矮蒿组合添加玉米后最大,说明矮蒿与牧草组合可提高牧草组合及其补饲玉米后的营养物质消化率,而矮蒿占比仅为高寒草甸中优势牧草的5.0%,且除粗脂肪含量外,其营养成分含量较异针茅和紫羊茅较低,分析其与其他牧草组合或添加玉米后可提高放牧动物饲料消化率的原因是某种活性物质

发挥了作用^[61,62]。综上,四种类型草场中大部分牧草组合后及牧草组合添加玉米发酵后其MFAEI表现正组合效应,证明部分牧草组合发酵及其添加玉米发酵后可提高营养物质消化率,促进瘤胃发酵从而增加72 h累积产气量。

4 结论

不同类型草场优势牧草营养物质及其消化率差异较大。大部分牧草组合、牧草组合与玉米混合发酵后其MFAEI表现正组合效应,可提高干物质、粗蛋白质、粗脂肪消化率。牧草组合后可提高纤维物质的消化率从而提高牧草的利用率,添加玉米后发酵底物结构发生改变,丁酸、异位酸等短链脂肪酸的含量得到增加,提高了有机物质的发酵和产气量。因此,可利用不同类型草场中优势牧草消化特点,通过补饲等方式均衡营养物质水平,从而促进家畜生长和牧草利用率,促进第一性生产力(牧草生产)向第二性生产力(家畜生产)的转化效率。

参考文献

- Gao S Q, Hu Z M, H Y, et al. On role and potential of grass-based livestock husbandry in poverty alleviation——Practice and pattern exploration of S&T poverty alleviation by Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2019, 34: 126, 223–230 [高树琴, 胡兆民, 韩勇, 等. 生态草牧业在我国精准扶贫中的作用和潜力——中国科学院植物研究所科技扶贫实践与模式探索. 中国科学院院刊, 2019, 34: 126, 223–230]
- Qi Y P. On grassland ecological construction and sustainable development of pastoral economy (in Chinese). *Chin Livest Poult Breed*, 2023, 19: 140–144 [靳玉平. 浅论草原生态建设与牧区经济可持续发展. 中国畜禽种业, 2023, 19: 140–144]
- Ding L M, Hu C S, Jiang C X, et al. Improving the grassland management strategies of Qinghai-Tibetan Plateau based on Israeli Noy-Meir's grazing-system dynamics model (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2020, 65: 3867–3872 [丁路明, 胡长胜, 姜翠霞, 等. 基于以色列Noy-Meir放牧系统动态模型提升青藏高原草地放牧管理决策. 科学通报, 2020, 65: 3867–3872]
- Liu L Y, Wang Z J, Yin Q, et al. Research on the *in vitro* digestibility and associative effects of three forage with different proportion (in Chinese). *Chin J Anim Vet Sci*, 2017, 48: 1066–1075 [刘丽英, 王志军, 尹强, 等. 3种饲草不同配比的体外消化特性及组合效应分析. 畜牧兽医学报, 2017, 48: 1066–1075]
- Menke K H, Raab L, Salewski A, et al. The estimation of the digestibility and metabolizable energy content of ruminant feeding stuffs from the gas production when they are incubated with rumen liquor *in vitro*. *J Agric Sci*, 1979, 93: 217–222
- Nsahlai I V, Umunna N N, Negassa D. The effect of multi-purpose tree digesta on *in vitro* gas production from napier grass or neutral-detergent fibre. *J Sci Food Agric*, 1995, 69: 519–528
- Mauricio R M, Mould F L, Dhanoa M S, et al. A semi-automated *in vitro* gas production technique for ruminant feedstuff evaluation. *Anim Feed Sci Tech*, 1999, 79: 321–330
- Sun L, Lee M, Jeon S, et al. Evaluation of the associative effects of rice straw with timothy hay and corn grain using an *in vitro* ruminal gas production technique. *Animals*, 2020, 10: 325
- Wei X S, Huang W Q, Zhang N F, et al. Evaluation of associative effects of cassava residue and protein feed ingredients using *in vitro* gas production technique (in Chinese). *Feed Industry*, 2023, 44: 23–29 [魏学盛, 黄文琴, 张乃锋, 等. 体外产气法评价木薯渣与不同蛋白质饲料原料的组合效应. 饲料工业, 2023, 44: 23–29]
- Zhou S L. On the evaluation of natural capital for grassland nature reserve—A case study of I. M. XILINGUOLE Grassland National Nature Reserve (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: Beijing Forestry University, 2009 [周树林. 草原类型自然保护区自然资本评估——以内蒙古

古锡林郭勒草原国家级自然保护区为例. 博士学位论文. 北京: 北京林业大学, 2009]

- 11 Wang D L, Wang L, Han G D, et al. Immunomodulatory activity of andrographolide on macrophage activation and specific antibody response (in Chinese). *Acta Pharmacol Sin*, 2022, 31: 191–201 [王德利, 王岭, 韩国栋. 草地精准放牧管理: 概念、理论、技术及范式. 草业学报, 2022, 31: 191–199]
- 12 Xiong Y, Xu J, Guo L, et al. Exploring the effects of different bacteria additives on fermentation quality, microbial community and *in vitro* gas production of forage oat silage. *Animals*, 2022, 12: 1122
- 13 Menke K H. Estimation of the energetic feed value obtained from chemical analysis and *in vitro* gas production using rumen fluid. *Anim Res Dev*, 1988, 28: 7–55
- 14 Feng Z C, Gao M. Improvement of the method for measuring ammonia nitrogen content in rumen fluid by colorimetry (in Chinese). *Anim Husbandry Feed Sci*, 2010, 31: 37 [冯宗慈, 高民. 通过比色测定瘤胃液氨氮含量方法的改进. 畜牧与饲料科学, 2010, 31: 37]
- 15 Erwin E S, Marco G J, Emery E M. Volatile fatty acid analyses of blood and rumen fluid by gas chromatography. *J Dairy Sci*, 1961, 44: 1768–1771
- 16 Zhang L Y. Feed Analysis and Quality Test Technology (4th Ed) (in Chinese). Beijing: China Agricultural University Press, 2016 [张丽英. 饲料分析及饲料质量检测技术(第4版). 北京: 中国农业大学出版社, 2016]
- 17 Groot J C J, Cone J W, Williams B A, et al. Multiphasic analysis of gas production kinetics for *in vitro* fermentation of ruminant feeds. *Anim Feed Sci Tech*, 1996, 64: 77–89
- 18 Wang W, Wu Q, Li W, et al. High-gossypol whole cottonseed exhibited mediocre rumen degradability and less microbial fermentation efficiency than cottonseed hull and cottonseed meal with an *in vitro* gas production technique. *Fermentation*, 2022, 8: 103
- 19 Wang X. A Technique for formulation of mixed forages by grading index and systematic optimization of sheep ration based on the technique (in Chinese). Master Thesis. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2003 [王旭. 利用GI技术对粗饲料进行科学搭配及绵羊日粮配方系统优化技术的研究. 硕士学位论文. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2003]
- 20 Wang C M. Responses in nutrient utilization efficiencies of cattle and sheep to the quality of major forages cultivated in Hexi Corridor (in Chinese). Doctor Dissertation. Lanzhou: Lanzhou University, 2020 [王春梅. 河西走廊主要栽培牧草的品质对肉牛和绵羊营养物质利用效率的影响. 博士学位论文. 兰州: 兰州大学, 2020]
- 21 Chen X L. Study on nutritive value and ruminal degradability characteristics of roughage in sheep (in Chinese). Master Thesis. Qingdao: Qingdao Agricultural University, 2014 [陈晓琳. 肉羊常用粗饲料营养价值和瘤胃降解特性研究. 硕士学位论文. 青岛: 青岛农业大学, 2014]
- 22 Wang Z J, Wu Z M, Yin F Q, et al. Effects of cellulase on the quality and dry matter degradation rate of pineapple residue silage. *Acta Agric Univ Jiangxiensis*, 2022, 6: 1399–1406
- 23 Luo Y, Wang H R, Hou Q R. Evaluation of associative effects of mulberry leaves and *Leymus chinensis* by *in vitro* ruminal fermentation method (in Chinese). *Chin J Anim Nutr*, 2018, 30: 2359–2368 [罗阳, 王洪荣, 侯启瑞. 利用体外瘤胃发酵法评价桑叶与羊草的组合效应. 动物营养学报, 2018, 30: 2359–2368]
- 24 Ma J, Ji H F, Jiang W C, et al. Advances in dietary fiber fermented by microbe and its application in animal production (in Chinese). *Chin J Anim Sci*, 2021, 57: 31–38 [马健, 季海峰, 蒋万春, 等. 发酵日粮纤维在动物生产中的应用研究进展. 中国畜牧杂志, 2021, 57: 31–38]
- 25 Li S L, Shi H T, Cao Z J, et al. Scientific utilization and evaluation technology of forage (in Chinese). *Chin J Anim Nutr*, 2014, 26: 3149–3158 [李胜利, 史海涛, 曹志军, 等. 粗饲料科学利用及评价技术. 动物营养学报, 2014, 26: 3149–3158]
- 26 Yang H M, Wang Y, Zhang Y F, et al. An *in vitro* culture method to examine the associative effects between roughage and concentrate feeds with different GI indexes (in Chinese). *Pratac Sci*, 2019, 36: 556–564 [杨洪明, 王宇, 张轶凤, 等. 基于体外培养法研究不同GI指数的粗饲料与精饲料之间组合效应. 草业科学, 2019, 36: 556–564]
- 27 Liu J Z. The nutritional effects and influencing factors of roughage on ruminants (in Chinese). *Chin J Anim Husbandry and Vet Medicine*. 2023, (6): 229–231 [刘军泽. 粗饲料对反刍动物的营养作用及影响因素. 畜牧兽医科技信息, 2023, (6): 229–231]
- 28 Wang J X, Tao H, Wang Z L, et al. Research progress on supplementary feeding of grazing livestock in cold season (in Chinese). *Chin J Anim Sci*, 2024, 60: 9–16 [王佳雪, 陶慧, 王振龙, 等. 放牧家畜冷季补饲研究进展. 中国畜牧杂志, 2024, 60: 9–16]
- 29 Si B W, Wang J, Zhang N F, et al. Effects of crude protein levels of rations on nutrients digestion and rumen fermentation in dorperx thin-tailed Han crossbred weaning lambs (in Chinese). *J Domest Anim Ecol*, 2014, 35: 33–38 [司丙文, 王俊, 张乃锋, 等. 日粮蛋白质水平对杜寒杂交断奶羔羊营养物质消化及瘤胃发酵的影响. 家畜生态学报, 2014, 35: 33–38]
- 30 Qiu Q, Wei X, Zhang L, et al. Effect of dietary inclusion of tea residue and tea leaves on ruminal fermentation characteristics and methane production. *Anim Biotechnol*, 2023, 34: 825–834
- 31 Gao H, Hao X Y, Zhang G N, et al. Nutritional evaluation of alternative feed sources by in Siu Nylon bag and invitro gas production technique (in Chinese). *China Feed*, 2017, (7): 14–19 [高红, 郝小燕, 张广宁, 等. 应用体外产气法和尼龙袋法评价几种粮食加工副产物的营养价值. 中国饲料, 2017, (7): 14–19]
- 32 Calsamiglia S, Ferret A, Devant M. Effects of pH and pH fluctuations on microbial fermentation and nutrient flow from a dual-flow continuous culture system. *J Dairy Sci*, 2002, 85: 574–579

- 33 Yang S M, Ma Y B, Tian M, et al. Evaluation of effects of cooperative fermentation by bacteria and enzymes on rumen fermentation characteristics of *Hedysarum scoparium*s by *in vitro* gas production method (in Chinese). *Chin J Anim Nutr*, 2023, 35: 7472–7480 [杨双鸣, 马煜斌, 田梅, 等. 体外产气法评价菌酶协同发酵对花棒瘤胃发酵特性的影响. *动物营养学报*, 2023, 35: 7472–7480]
- 34 Li M S, Xue S Y, Wang C, et al. Effects of *Salix* mixed fermented feed on ruminal environmental parameters by *in vitro* gas production method (in Chinese). *Chin J Anim Nutr*, 2015, 27: 1943–1953 [李满双, 薛树媛, 王超, 等. 体外产气法研究沙柳混合发酵饲料对绵羊瘤胃内环境参数的影响. *动物营养学报*, 2015, 27: 1943–1953]
- 35 Wang D, Fang J, Xing F, et al. Alfalfa as a supplement of dried cornstalk diets: Associative effects on intake, digestibility, nitrogen metabolization, rumen environment and hematological parameters in sheep. *Livestock Sci*, 2008, 113: 87–97
- 36 Mertens D R. Predicting intake and digestibility using mathematical models of ruminal function. *J Anim Sci*, 1987, 64: 1548–1558
- 37 Zhang X D. Influence of supplementary starch on associative effects in ruminants and approach to the mechanisms (in Chinese). Doctor Dissertation. Hangzhou: Zhejiang University, 2008 [张显东. 补饲淀粉对反刍动物饲料组合效应的影响及其机理研究. 博士学位论文. 杭州: 浙江大学, 2008]
- 38 Wolin M J. A theoretical rumen fermentation balance. *J Dairy Sci*, 1960, 43: 1452–1459
- 39 Niderkorn V, Baumont R, Le Morvan A, et al. Occurrence of associative effects between grasses and legumes in binary mixtures on *in vitro* rumen fermentation characteristics I. *J Anim Sci*, 2011, 89: 1138–1145
- 40 Copani G, Ginane C, Le Morvan A, et al. Patterns of *in vitro* rumen fermentation of silage mixtures including sainfoin and red clover as bioactive legumes. *Anim Feed Sci Tech*, 2015, 208: 220–224
- 41 Visentin G, Niero G, Berry D P, et al. Genetic (co)variances between milk mineral concentration and chemical composition in lactating Holstein-Friesian dairy cows. *Animal*, 2019, 13: 477–486
- 42 Hu H L, Lu D X, Liu D C, et al. Effects of different dietary NFC/NDF ratios on ruminal pH, VFA and lactate content in dairy goats (in Chinese). *Chin J Anim Nutr*, 2010, 22: 595–601 [胡红莲, 卢德勋, 刘大程, 等. 日粮不同NFC/NDF比对奶山羊瘤胃pH、挥发性脂肪酸及乳酸含量的影响. *动物营养学报*, 2010, 22: 595–601]
- 43 Long Y, Ma X X, Nie C X, et al. Effects of adding isoacids in perinatal diets on performance, apparent digestibility of nutrients, rumen fermentation parameters of dairy cows, and serum indicators of dairy cows and newborn calves (in Chinese). *Chin J Anim Nutr*, 2023, 35: 6423–6437 [龙锐, 马小雪, 聂存喜, 等. 围产期饲料中添加异位酸对奶牛生产性能、营养物质表观消化率、瘤胃发酵参数和奶牛、新生犊牛血清指标的影响. *动物营养学报*, 2023, 35: 6423–6437]
- 44 Firkins J L. Reconsidering rumen microbial consortia to enhance feed efficiency and reduce environmental impact of ruminant livestock production systems. *R Bras Zootec*, 2010, 39: 445–457
- 45 Zhang Z W, Zhu M X, Wang C F. Effects of isoacids on ruminal metabolism and performance in ruminants: A review (in Chinese). *Chin J Anim Nutr*, 2022, 34: 1408–1415 [张振威, 朱明霞, 王长法. 异位酸影响反刍动物瘤胃代谢和生产性能的研究进展. *动物营养学报*, 2022, 34: 1408–1415]
- 46 Wang F W, He Y Q, Zheng Y H, et al. Effects of dietary energy levels on rumen fermentation, digestion and metabolism and plasma biochemical parameters of dairy cows during dry period (in Chinese). *Chin J Anim Nutr*, 2021, 33: 5690–5700 [王富伟, 何雅琴, 郑宇慧, 等. 饲料能量水平对干奶期奶牛瘤胃发酵、消化代谢及血浆生化指标的影响. *动物营养学报*, 2021, 33: 5690–5700]
- 47 Tang D F, Yuan J, Wang Y Q, et al. Evaluation using a gas production technique *in vitro* of associative effects on digestibility of corn cob, alfalfa and concentrate in mixed (in Chinese). *Acta Pratac Sin*, 2019, 28: 137–147 [唐德富, 袁玖, 王彦乾, 等. 玉米芯与苜蓿、精料配比对饲料组合效应的影响. *草业学报*, 2019, 28: 137–147]
- 48 Penner G B, Oba M, Gäbel G, et al. A single mild episode of subacute ruminal acidosis does not affect ruminal barrier function in the short term. *J Dairy Sci*, 2010, 93: 4838–4845
- 49 Zhou Y, Diao Q Y, Dong L F, et al. The effect of different ratios of dietary non-fibrous carbohydrate (NFC) to neutral detergent fiber (NDF) on production performance, nutrient digestibility and methane emissions of Dorper×Thin-tailed Han crossbred growing ewes (in Chinese). *Chin J Anim Vet Sci*, 2018, 49: 1405–1415 [周艳, 刁其玉, 董利锋, 等. 饲料非纤维性碳水化合物(NFC)与中性洗涤纤维(NDF)比例对育成期杜寒杂交母羊生长性能、营养物质消化率和甲烷产量的影响. *畜牧兽医学报*, 2018, 49: 1405–1415]
- 50 Wu B, Zhao Y M, Yang H M, et al. The effects of different feed additives on rumen liquid fermentation and methane emissions in sheep (in Chinese). *Chin Anim Husbandry Vet Abstracts*, 2017, 33: 225–227 [武斌, 赵玉民, 杨华明, 等. 不同饲料添加剂对肉羊瘤胃液体体外发酵及甲烷排放量的影响. *中国畜牧兽医文摘*, 2017, 33: 225–227]
- 51 Meng X, Cao Q, Sun Y, et al. 16S rRNA genes- and metagenome-based confirmation of syntrophic butyrate-oxidizing methanogenesis enriched in high butyrate loading. *Bioresour Tech*, 2022, 345: 126483
- 52 Cheng J, Zhang Y Q, Zhang D D, et al. Digestive characteristics and associative effects of whole corn silage, wheat straw and alfalfa hay (in Chinese). *Chin J Anim Nutr*, 2021, 33: 2982–2992 [程景, 张元庆, 张丹丹, 等. 全株玉米青贮、小麦秸秆、苜蓿干草组合的体外消化特性及组合效应研究. *动物营养学报*, 2021, 33: 2982–2992]

- 53 Liu L L, Sun F B, Gesang Z M, et al. Evaluation of nutritional value of roughage for yaks based on *in vitro* rumen fermentation technology (in Chinese). *Feed Industry*, 2024, 45: 21–28 [刘乐乐, 孙锋博, 格桑卓玛, 等. 基于体外瘤胃发酵技术评价粗饲料对牦牛的营养价值. *饲料工业*, 2024, 45: 21–28]
- 54 Xu J, Hou Y J, Liu H, et al. Study on degradation of forage in rumen (in Chinese). *China Dairy Cattle*, 2013, 45-51 [徐俊, 侯玉洁, 刘红, 等. 牧草纤维瘤胃内降解研究进展. *中国奶牛*, 2013, 45-51]
- 55 Li J L, Liu S J, Chai S T, et al. Evaluation of fermentative nutrition characteristics of supplementary concentrate mixed with native pastures by Gas Production Technique *in vitro* (in Chinese). *Acta Agrest Sin*, 2015, 23: 850–858 [李积兰, 刘书杰, 柴沙驼, 等. 体外产气法评价精补料与冷季天然牧草组合发酵营养特性. *草地学报*, 2015, 23: 850–858]
- 56 Sun G Q, Lv Y Y, Zhang J J. A study on the associative effect of whole corn silage-peanut vine and *Leymus chinensis* by rumen fermentation *in vitro* (in Chinese). *Acta Pratac Sin*, 2014, 23: 224–231 [孙国强, 吕永艳, 张杰杰. 利用体外瘤胃发酵法研究全株玉米青贮与花生蔓和羊草间的组合效应. *草业学报*, 2014, 23: 224–231]
- 57 Zhang Y, Zhu X P, Li J Y, et al. Combination effects between regular roughages of alfalfa hay and Chinese wildrye in Liaoning cashmere goats (in Chinese). *Chin J Anim Nutr*, 2013, 25: 2481–2488 [张锐, 朱晓萍, 李建云, 等. 辽宁绒山羊常用粗饲料苜蓿和羊草间饲料组合效应. *动物营养学报*, 2013, 25: 2481–2488]
- 58 Yu M M, Jiang Y X, Zhang M M, et al. Evaluation of associative effects of alfalfa meal and ammoniated corn straw by gas production technique *in vitro* (in Chinese). *Chin Anim Husbandry Vet Med*, 2017, 44: 3497–3504 [于满满, 姜雨轩, 张美美, 等. 利用体外产气法评定不同比例氨化秸秆替代苜蓿的组合效应. *中国畜牧兽医*, 2017, 44: 3497–3504]
- 59 Lu D X. *An Introduction to Systems-Nutrition of Animals* (in Chinese). Beijing: China Agricultural Press, 2004 [卢德勋. *系统动物营养学导论*. 北京: 中国农业出版社, 2004]
- 60 Zhang Q, Niu J M, Ding Y, et al. Current research advances and future prospects of biology and ecology of *Stipa breviflora* (in Chinese). *Chin J Grassland*, 2010, 32: 93–101 [张庆, 牛建明, 丁勇, 等. 短花针茅生物学与生态学研究现状与展望. *中国草地学报*, 2010, 32: 93–101]
- 61 Gong S X. The active ingredients in *Artemisia annua* that inhibit inducible nitric oxide synthase (in Chinese). *Int J Trad Chin Med*, 2001, (1): 21 [龚苏晓. 矮蒿中抑制诱导型一氧化氮合酶的活性成分. *国外医学(中医中药分册)*, 2001, (1): 21]
- 62 Editorial Committee of Higher Plant Atlas in the Liaohe River Basin. *Atlas of Higher Plants of Liaohe River Basin* (in Chinese). Beijing: China Environmental Science Press, 2017 [辽河流域高等植物图鉴编委会. *辽河流域高等植物图鉴*. 北京: 中国环境出版社, 2017]

Summary for “不同类型天然草场优势牧草及其与补饲玉米组合效应研究”

Study on dominant pasture grasses in different types of natural grasslands and their combination effects with supplemental maize

Xiuhua Ma^{1†}, Jie Bao^{1†}, Bo Zhang^{1†}, Zhi Wang¹, Jiaguan Liu¹, Yuting Wang¹, Yang Wang², Xiaojia Zhang³, Minle Xu⁴, Hongbiao Zi⁵ & Hailing Luo^{1*}

¹ State Key Laboratory of Animal Nutrition and Feeding, College of Animal Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China

² State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

³ Key Laboratory of Grassland Resources of the Ministry of Education, College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, 010011 China

⁴ College of Grassland Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China

⁵ State Key Laboratory of Herbage improvement and Grassland Argo-ecosystems, College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China

† Equally contributed to this work

* Corresponding author, E-mail: luohailing@cau.edu.cn

With the intensification of conflicts between the yield of natural grassland forage and the demand for feed by livestock intensifying, the degradation of grasslands has led to a decrease in the quality of forage provided. Therefore, supplementing corn for grazing livestock has become common. Improving the utilization rate of forage is beneficial for maintaining the balance between grass and livestock. Therefore, it is particularly important to clarify the types and nutritional values of dominant forage and supplementary feed in grasslands, as well as their digestion and interaction in animal bodies. *In vitro* fermentation technology is widely used in the evaluation of forage nutritional value and the study of feed combination effects due to its simple, rapid, and economical methods. This technology effectively overcomes the complexities of animal trials and the variability influenced by individual animal differences and physiological conditions. The aim of this study is to investigate the nutritional value of main forage grasses in different types of grassland and their interactions in the rumen of ruminants. By collecting samples of the top three dominant forage grasses in the four different types of grassland in China, including typical steppes, desert steppes, meadow steppe, and alpine steppes, and combining them with corn in pairs, the nutritional fermentation characteristics and gas production kinetics were studied using rumen *in vitro* fermentation technology, and the comprehensive combination effect index (MFAEI) was evaluated. The results showed that most of the dominant grasses in the four types of grasslands were combined with each other, or adding corn to the grass combination could improve the digestibility of dry matter (DM), crude protein (CP), and crude fat (EE). The combination of forage can improve the neutral detergent fiber digestibility (NDFD) and acidic detergent fiber digestibility (ADFD) of forage to varying degrees. Although it does not affect the rumen fermentation parameters and gas composition ratio, and adding corn will change the structure of fermentation substrates, increase the content of short chain fatty acids such as butyric acid and ectopic acid, and increase the proportion of methane to varying degrees. Among of them, adding corn to forage combinations in typical grasslands will significantly increase the proportion of methane. Most grass combinations and their MFAEI after mixed fermentation with corn exhibit a positive combination effect. Among them, the first dominant grass in typical grasslands and desert grasslands, such as *Leymus chinensis* and *Stipa breviflora*, and the *Artemisia* genus grass in meadow grasslands and alpine grasslands, all show a positive effect. Therefore, by utilizing the digestion characteristics of dominant forage in different types of grasslands and leveraging the combination effect of forage, the utilization rate of forage can be improved, promoting the conversion efficiency from primary productivity (forage production) to secondary productivity (livestock production).

natural grasslands, dominant plants, the utilization efficiency of forage, combining effective

doi: [10.1360/TB-2024-0209](https://doi.org/10.1360/TB-2024-0209)